Ta バリア MgB₂ 線材を用いた小コイルの熱的安定性

田中 和英^{*1,†}, 中尾 彰浩^{*1}, 浦竹 勇希寛^{*1},
 柁川 一弘^{*1}, 船木 和夫^{*1}, 岡田 道哉^{*2}

Thermal Stability of Small Coil using Ta Barrier MgB₂ Wire

Kazuhide TANAKA^{*1,†}, Akihiro NAKAO^{*1}, Yukihiro URATAKE^{*1},
 Kazuhiro KAJIKAWA^{*1}, Kazuo FUNAKI^{*1} and Michiya OKADA^{*2}

Synopsis: We have fabricated a small test coil with an AlN former by employing Cu-Ni sheathed Ta barrier MgB₂ multifilamentary wire made in a wind-and-react process. An overcurrent was applied to the coil conduction-cooled in an initial temperature range between 10 K and 30 K to investigate its thermal stability by measuring the temperature distribution in the winding and the terminal voltage after application of the overcurrent. The experimental results show that the permissive temperature rise without thermal runaway decreases with the initial temperature, while total heat generation at the time of thermal runaway is at a maximum when the initial temperature is approximately 14 K. We also numerically calculated the responses of the test coil to the overcurrent by simulating the electrical and thermal processes using the finite element method and *V-I* characteristics of the coil. The comparisons with the experimental results show that the electrical and thermal responses are reproduced well using the numerical model.

Keywords: MgB₂, in-situ PIT process, critical current density, conduction cooling, thermal stability

1. はじめに

2001 年に発見された二ホウ化マグネシウム(以下, MgB₂ と略す)は, 金属系超伝導材料としては非常に高い 39 K の臨界温度(以下, T_c と略す)を有する¹⁾. この T_c は, 現在超伝導材料として主に用いられている NbTi ($T_c=9.8$ K)や Nb₃Sn ($T_c=18$ K)と比較して, 20 K 以上も高い. このため, 液体ヘリウムあるいは冷凍機冷却で使用した場合に温度マージンを大きくできるので, クエンチ(温度上昇による超伝導から常伝導への転移)が生じにくいマグネット用材料として期待されている. T_c が高いこと以外にも, 酸化物超伝導体では不可欠な結晶の向きを揃えること(配向化)が不要であること, 資源的に豊富で原料が比較的安価であること, 材料そのものの機械的特性が高いこと, 軽量であること等のメリットがある. このため, 発見以来, 多くの研究機関で長尺線材化や臨界電流密度(以下, J_c と略す)の向上を目指した研究が行われてきた²⁻⁴⁾. 現在では, 1 km を超す線材や, MRI マグネットの試作が行われ画像の撮影にも成功している^{5,6)}. さらに, 永久電流モードでの長時間

運転も可能なレベルになっており⁷⁾, MgB₂ 超伝導体の更なる特性向上により, 産業用, 医療用, 運輸用, 電力用などの様々な分野での応用の拡大が期待される.

MgB₂ 線材を用いた応用技術は, まだ開発途上のフェーズであるが, 実用化に際しての設計指針を得るためには, これまでの金属系や酸化物超伝導線材と同様に, 線材レベルやコイル構造レベルで超伝導特性や交流損失特性に加えて, 安定性や常伝導転移過程を定量化する要素的研究が必要である. 具体的には, T_c が従来の金属系と酸化物系の間位置する MgB₂ のコイル設計において, 熱特性やコイル保護の観点から, 両者のどちらに近い特性を示すのかを明らかにする必要がある. しかしながら, 発見以降, 研究の流れは, まだ高 J_c 化, 長尺化, コイル試作等の黎明的研究がほとんどであり, 本格的なマグネット応用に向けた上述の課題に対する系統的な研究は十分とはいえないのが実情である.

これまで我々の研究グループでは, その熱的特性評価の第一歩として, 液体ヘリウム浸漬冷却中における MgB₂ 線材の常伝導部の伝播速度を測定し, 印加磁場や通電する電流値に対する最小伝播電流値(常伝導部の伝播が起こらないための通電電流の上限値)や常伝導部の伝播速度などの熱的特性を測定し, これらの特性と冷却条件との関係を定量的に評価してきた⁸⁾. その結果, 常伝導部の伝播は, 酸化物超伝導線材の伝播速度に比べると比較的高速であるが, 従来の金属系超伝導線材と比べるとかなり遅い結果が得られており, 両者の中間的なレベルになっていることが分かってきた. このような常伝導部の伝播現象についての要素的研究に加えて, 熱的擾乱に対す

Received December 4, 2009

^{*1} 九州大学超伝導システム科学研究センター

〒813-0935 福岡県福岡市西区元岡 744

Kyushu University, 744 Moto-oka, Nishi-ku Fukuoka, 819-0935, Japan

^{*2} 独立行政法人 産業技術総合研究所

〒305-8568 茨城県つくば市梅園 1-1-1

AIST, 1-1-1 Umezono, Tsukuba, Ibaraki 305-8568, Japan

[†] E-mail: kazuhide.tanaka.je@hitachi.com

る安定性についての定量的評価を行うことにより, MgB_2 コイルの安定性やクエンチ保護対策の考え方を明確化できる。

本研究では, 伝導冷却 MgB_2 コイルの応用を念頭におき, Cu-Ni シース Ta バリア MgB_2 多芯線材を用いて作製した試験用小コイルを, 幅広い温度領域で過電流通電した。そして, コイルの熱的応答の実験結果と数値解析結果から, MgB_2 コイルの熱的安定性に対するの基盤を提示することを目指した。

2. 実験方法

2.1 Cu-Ni シース Ta バリア MgB_2 多芯線材の作製方法

MgB_2 の線材化についてはいくつかの手法が提案されてきたが, 量産化には粉末を金属管に充填する Powder-In-Tube (以下, PIT と略す) 法が最も優れる。本研究では, 将来の長尺線材化を念頭においているため, PIT 法を適用する。PIT 法による MgB_2 線材の作製手法は, 2 つに大別される。

1 つは Mg 粉末と B 粉末を混合し, その混合粉末を金属管に充填後, 最終形状まで伸線(圧延)加工し, 熱処理を行って超伝導線材にする in-situ 法である⁹⁾。 MgB_2 合成時の体積減少により線材コア中に空隙が生じる課題があるものの, 加工や熱処理プロセスの改善により, 上部臨界磁場(以下, B_{c2} と略す)並びに J_c 向上の可能性が高く, 現在では NbTi 線材に匹敵する性能が得られつつある。但し, in-situ 法では, Mg や B と冶金的に反応しないシース材を選択する必要がある。もう 1 つの手法は, あらかじめ合成した MgB_2 粉末を金属管に充填し, 最終形状まで伸線(圧延)加工する ex-situ 法である¹⁰⁾。この手法は, 加工後に熱処理をしなくても超伝導線材になるため低コスト化には有利な製法であるが, 充填する MgB_2 超伝導粉末の特性に左右されるところが大きい。このため, 高い J_c を再現性良く実現するのが困難という問題がある。しかしながら, in-situ 法と組み合わせた ex-situ 法を用いることで良質な粉末を充填することが可能となり, ex-situ 法でも高い J_c が得られることがわかってきた¹¹⁾。ただし, 高性能な粉末の量産化には課題が残り, これを実用化するにはブレイクスルーが必要である。

本研究では, ex-situ 法に比べて, 不純物添加や粉末微細化などの効果により, 将来的に超伝導特性の改善が見込める in-situ 法に着目し, MgB_2 多芯線材を作製した。ただし, 本研究は特性向上よりも熱的安定性についての基盤を提示することが目的であるので, 化学量論組成を採用している。Mg 粉末とアモルファス B 粉末を 1:2 の組成比に秤量した後, アルゴン(Ar)雰囲気中でボールミル混合した。粉末を充填する金属管(バリア材)には, Mg や B との反応による I_c 劣化が小さい純 Ta 管を用いた。また, Ta の外側には Cu-10%Ni 管(以下, Cu-Ni と略す)を被せた。本研究では, フラックスジャンプの抑制や磁化の影響を考慮し, バリア材には 9 K 以下で超伝導状態になる Nb, あるいは磁性体である Fe は採用しなかった。また, Cu-Ni は, 4~40 K の温度領域では Cu の 1000 倍の電気抵抗を持ち, 交流通電及び磁場を変動させた場合に生じる結合損失を低減させるのに有効である。しかしながら, 多芯線材における

Fig. 1 Cross sectional view of the MgB_2 mono-core wire and 6-filament wire.

Table 1 Specifications of the MgB_2 6-filament wire

	Cu-10%Ni-sheathed wire
Barrier	Ta
Wire dia.	0.78 mm
Structure	MgB_2 / Cu / Ta / Cu-Ni 0.095/0.06/0.10/0.745
Twist pitch	50 mm
Number of filament	6
Filament size	0.10 mm

シース材(母材)がすべて Cu-Ni の場合は, その抵抗の大きさから, 熱的安定性やクエンチ時の発熱低減に問題が生じる。このため, Fig. 1(b)のように中央部に Cu を配置した。

Fig. 1(a)に伸線加工後の単芯線材の横断面を示す。その後, 得られた線材を 6 等分の長さになるように切断し, これを Cu-Ni 合金管に組み込んだ。用いた Cu-Ni 管は, 外径 26 mm, 長さ 250 mm であり, ガンドリル方式で 7 箇所穴開け加工を施している。なお, 穴径はすべて 5.6 mm である。ガンドリルで穴を開けた箇所の中央には Cu, その周囲の 6 箇所に単芯線材を組み込んだ。その後, 1 パス当たり 10~17%の加工度で縮径加工し, 外径 0.78 mm にした。

得られた Cu-Ni シース Ta バリア MgB_2 /6 芯線の横断面を Fig. 1(b), その仕様を Table 1 に示す。得られた線材の MgB_2 超伝導コア比は 9.5%である。ツイストピッチは 50 mm である。

2.2 コイルの作製方法

2.1 の工程で作製した Cu-Ni シース Ta バリア MgB_2 /6 芯線を用いてソレノイドコイルを作製した。本研究では, 巻線してから熱処理を施す Wind-and-React 法を適用した。コイル巻線は, 線材に一定の張力をかけながら整列巻きした。巻線中の断線やキングの発生はなく, 健全に巻線できた。熱処理条件は, Ar 気流中で, 600℃, 1時間とした。巻線した線材の長さは 58 m で, コイルのターン数は 400 である。コイル定数は 0.0082 T/A であり, 100 A 通電したときに 0.82 T の中心磁場が得られる計算となる。なお, 線材表面の絶縁は, 耐熱性ガラスを編組被覆するものとした。

本コイルは伝導冷却を行うことから, ボビン熱伝導が良好な窒化アルミ製(以下, AlN と略す)とした。形状は, 内径 35

mm(ボア径 25 mm), 外径 98 mm, 高さ 48 mm である。コイル最内層部では, 最大で 2.2%の曲げ歪が加わっているが, 事前確認において本線材は曲げ歪が 3%以内であれば, 巻線後に熱処理を行うことで線材性能は低下しないことを明らかにしており, 今回の曲げ歪は許容値である。

通電試験を行うにあたり, コイルに温度センサなどの計測線を取り付けるため, ボビンの中央部と下部に貫通孔を設けた。コイル内部に配置される線材の層間, ターン間, 線材とボビン間には, 10^{-1} Pa 以下の真空度で熱伝導性が良好なエポキシ樹脂で含浸を行った。Fig. 2 にエポキシ含浸後のコイルの外観を示す。また, Table 2 にコイルの仕様を示す。コイルの巻線後及び熱処理後に室温で 250 V の絶縁耐圧試験を行い, 巻線部における短絡などの問題が生じていないことを確認した。

2.3 評価方法

MgB₂ コイルの I_c は, 直流四端子法を用いて測定した。その際, 温度調整可能な内挿クライオスタット内のコールドヘッドに MgB₂ コイルを装着し, 5~30 K の温度範囲で特性評価した。冷媒はヘリウムガス冷却とし, 温度制御は, 冷却ガス流量と, 試料上部に取り付けたヒータ電流を調整することで行った。

Fig. 3 に本研究で使用したクライオスタット概略図とコイルへの温度センサ取り付け位置を示す。コイル温度は, ボビン中央部, ボビン下部, 巻線部下端(それぞれ, T_{ic} , T_{ib} , T_{ob} と記す)に設置したセルノックス温度センサで測定した。コイル上フランジと冷却ヘッドはグリースを介して面接触させ, ボビンを介した伝導冷却とした。

Fig. 2 A photograph of the MgB₂ test coil.

Table 2 Specifications of the MgB₂ test coil

Wire	Length	58 m
Coil	Inner dia.	35 mm
	Outer dia.	51 mm
	Height	48 mm
	Turn	40×10
	Inductance	3.66 mH
	Coil const.	0.0082 T/A
Insulator	T-glass	
Resin	Epoxy (in vacuum)	

Fig. 3 Cross-section of the present cryostat and the MgB₂.

3. 通電試験と数値解析

3.1 過電流通電試験

2.2 節で示した試験用コイルを用いて, 過剰電流通電に伴う磁束フロー損失によって発生する熱負荷に対してのコイルの熱的安定性を検討した。これにより, 危険な熱負荷のレベルや冷却条件との関係など, 大まかなコイルの熱的応答特性についての目安を得ることができる。まず, 作製したコイルの各温度での I_c を把握するために, 5~30 K の温度範囲でコイル I_c を測定した。その結果を Fig. 4 に示す。温度は T_{ic} の実測値である。また, バイアス磁場はいずれも加えていない。得られた I_c は, 通常の製法で作製するコイルと比較して 1 桁低いことがわかった。この原因を明らかにするため, 走査型電子顕微鏡 (Scanning Electronic Microscope) 及びエネルギー分散 X 線分光法 (Energy Dispersive X-ray spectrometry) による断面調査の結果, 加工中の Ta バリア層の破れにより, 熱処理過程で Mg と Cu の化合物が生成し, 超伝導相の割合が低減していたことがわかった。しかし, ここでの目的は, コイルの熱負荷に対する応答特性を評価することであるため, このコイルに過電流通電して応答を観測することにした。

コイルの通電電流は, 1.04 A/s の変化率で掃引してある所定値でホールドし, その後急速遮断した。コイル I_c の温度依存性で得られた結果をもとに, 通電電流のホールド値を I_c レベル

から始めて、 I_c の 10% 刻みで増加させた。以上のような通電パターンを、熱暴走が観測されるまで電流のホールド値を増加させながら繰り返し通電した。詳細は後述するが、例えば、初期設定温度が 14 K の場合、通電電流値を I_c の 1.0~1.5 倍の範囲で上昇させ、 $I = 1.5 I_c$ のときに熱暴走と判断し、それ以上の通電は行わなかった。なお、ここでは、 I_c を超える過剰な電流を 300 秒間継続して通電させた。その際、温度センサを設置したコイル各部の温度変化とコイルの両端電圧応答を測定した。

Fig. 5(a)~(d)に初期設定温度 14 K のときの測定結果を示す。各通電において、上から順にコイル両端電圧、 T_{ic} 、 T_{ob} 、 T_{ib} の時間変化を示す。電流掃引時には、両端電圧に誘導電圧が重畳されている。3 箇所の温度の初期値が若干異なっているのは、直前の測定からの時間経過が短かったため、温度の均一化が不十分なためである。ここでは、初期温度からの温度上昇分に着目した。 I_c を通電した場合 ($I = 1.0 I_c$) には、若干の温度上昇分がほぼ均一であることから、AlN 製ボビンによる冷却が有効であるといえる。このときのコイル巻線部全体の発熱は、コイル端子電圧と通電電流の積として求めると 0.15 W である。一方、 $I = 1.2 I_c$ 及び $1.4 I_c$ 通電時の場合には、ほぼ $\Delta T_{ic} = \Delta T_{ib}$ となっていることから、ボビン内筒部自体の温度上昇は認められるものの、ボビンを介した冷却はまだ有効に働いているといえる。300 秒間の通電ではクエンチには至らないことから、熱的な安定性も維持できていると判断した。ボビンの上フランジに熱接触させている冷却ヘッド部の温度は、通電前の温度レベルを維持する制御を行っているため、この温度上昇分は主に冷却ヘッド部とボビンとの温度差になっているものと推察される。

また、 T_{ic} 、 T_{ib} の上昇分と比べて T_{ob} の上昇分が多少大きく、通電電流値を大きくする毎に温度差も大きくなった。これは T_{ob} が冷却ヘッド部から最も離れており、冷却が効きにくくなっていることによるものと考えられる。

Fig. 4 Temperature dependence of I_c evaluated from the coil V-I characteristics.

Fig. 5 Responses of terminal voltage and sensor temperature to overcurrent. (a) $1.0 I_c$, (b) $1.2 I_c$, (c) $1.4 I_c$ and (d) $1.5 I_c$.

これに対し、 $1.5 I_c$ 通電時には、Fig. 5(d)の電圧の応答に矢印で示す変曲点が観察されたことから、熱暴走と判断できる。このときのコイル全体での発熱は 1.95 W に達した。しかしながら、コイル両端電圧や温度変化は比較的緩やかであるため、コイル保護の観点からは十分に対策可能なレベルであると考えられる。

次に、過電流通電において、温度上昇が顕著であった T_{ob} の上昇分の漸近値について、その過電流設定値への依存性を全ての初期設定温度についてまとめたものを Fig. 6 に示す。測定は初期設定温度 $10 \sim 30 \text{ K}$ の範囲で実施した。図中の縦線は、各初期設定温度において、熱暴走を観測した過電流レベルを表している。初期設定温度が低いほど、熱暴走に至るまでの温度上昇に余裕があることがわかる。具体的には、初期設定温度が 10 K の場合は温度上昇が 3.7 K 程度でも熱暴走に至ってはいないが、 30 K の場合はわずか 0.8 K を超す程度の温度上昇で熱暴走した。これは初期設定温度が低いほど、 T_c に至るまでの余裕度(温度マージン)が大きいことによるものだろう。

Fig. 7 に熱暴走開始時のコイル発熱の初期温度依存性を示す。この発熱が熱暴走を抑制できる発熱量の上限とすると、その限界レベルが $12 \sim 14 \text{ K}$ の範囲内で極大値を持つことがわかる。一般に、伝導冷却による冷却効果と巻線部の発熱分布との熱的バランスにより安定なコイル運転が維持できているが、コイル発熱が大きくなって、このバランスが崩れると熱暴走に至ると考えられる¹²⁾。この要因として、温度マージンの初期温度依存性だけでなく、ボビンも含めたコイル全体の各種材料における伝熱効率の影響も考えられる。その場合には、熱的に安定な動作特性を持つコイルの冷却構造を設計するに当たり、伝熱材料の熱伝導率の温度依存性までを考慮した解析が必要になる。今後は、これらのことにも着目し、コイル化における熱設計データベースを蓄積することが課題である。

過電流による磁束フロー損失と交流損失の発生機構は異なるが、ここでは、磁束フロー損失に対する許容レベルをそのまま交流損失に適用して、交流損失の許容レベルの目安を検討する。Fig. 7 に見られる許容発熱量のピーク値 1.75 W を交流損失密度に換算する。Table 2 からコイルの体積を見積もると $2.77 \times 10^{-5} \text{ m}^3$ となる。これにより、許容される平均的な交流損失密度は $6.31 \times 10^4 \text{ W/m}^3$ となる。あらかじめ測定した Cu-Ni シース Ta バリア MgB_2 多芯線の磁界振幅が 1 T 、周波数が 1 Hz での交流損失密度は $10^4 \text{ J/m}^3 \times 1 \text{ Hz} = 10^4 \text{ W/m}^3$ 程度であり、この使用条件下では、上記の許容発熱量と比べてまだ低いレベルで安定動作の面では問題ないといえる。またここでは、コイル全体に均一な交流横磁界が印加されているときの損失値になっており、コイル内での実際の磁界分布を考えると余裕をもった見積もりになっている。しかし、磁界振幅が 1 T でも周波数が 6 Hz を超える領域では、交流損失自体が Fig. 7 の許容値に達することになる。実際のコイルでは、上記の許容値は形状や冷却構造に敏感に依存すると考えられる。交流損失低減の目標

Fig. 6 Temperature rise in T_{ob} after 300 s application of overcurrent.

Fig. 7 Initial temperature dependence of total heat generation for thermal runaway.

は、冷凍機の全体的な熱負荷に対する許容レベルに加えて、安定動作の観点からの許容レベルまでを考慮した設定が必要になる。

3.2 数値解析

コイル全体に分布する熱的擾乱について実験と数値解析の両面から評価し、コイルの熱特性をモデル化する。そこで 3.1 節で行った過電流通電試験の結果を近似的に再現できる解析コードを作成し、過電流通電時におけるコイルの両端電圧、及び各温度センサ部の温度推移の数値シミュレーションを行った。今回は過電流通電試験時に得られたコイルの平均的な $V-I$ 特性を採用し、コイル巻線部での一様な発熱に対するコイルの熱的応答について解析を行った。

数値解析は、熱伝導方程式に重みつき残差法、特に Galerkin 法を適用し、導かれた方程式を有限要素法により解いて実施した。解析モデルについて、今回用いたコイルは軸対称性を持つので計算を簡略化するために 2 次元軸対称モデルを用いた。モデルは巻棒である AIN 部と巻線部とに分かれ

ており、巻線部は MgB_2 線材と含浸材であるエポキシ樹脂が含まれている。冷却条件として、コイル上フランジ部と冷却ヘッド部との境界面の温度を一定としている。また、過電流による発熱は、過電流通電試験時に得られたコイルの V - I 特性を n 値モデルで近似することにより評価した。このうち、コイルの I_c については Fig. 4 に示した測定結果の近似曲線を、得られた n 値については Fig. 8 に破線で示した試行関数を用いた¹³⁾。

過電流通電試験時と同様に、初期設定温度を 10 K から 30 K まで 5 K 刻みに設定し、数値解析を行った。Fig. 9 及び Fig. 10 に初期設定温度を 14 K, $I = 1.5 I_c$ とした際のコイル両端電圧、及び各温度センサ部の温度推移の数値解析の結果を示す。解析の際に採用した各部の熱特性値等は文献 13 を参照願いたい。Fig. 9 とコイル両端電圧の実測値(Fig. 5(d))を比較すると、電流掃引時($0 \leq \text{time} \leq 33$)には多少ずれが生じているが、一定電流通電時は実験結果と概ね一致した。また、同様に、各温度センサ部についても、多少の温度差や温度上昇の速さに違いはあるものの、実験結果と概ね一致している。

次に、数値解析から得られた熱暴走電流 I_{tr} と実験結果との比較を Fig. 10 に示す。ここで、 I_{tr} は、試験時と同様に、過電流通電後 300 秒以内に両端電圧の経時変化曲線に変曲点が生じた通電電流値とした。初期設定温度が 10 K 及び 14 K においては多少外れてはいるが、実験時に熱暴走前と熱暴走と判断した電流値との範囲内で熱暴走となるような解析結果が得られた。また、温度が上昇しコイル I_c が低下するのにはほぼ比例して、 I_{tr} も低下していることがわかる。

以上のことから、今回作成した解析コードは概ね妥当であり、実験結果を近似的に再現できていると言える。しかし、初期設定温度によっては一部で定量的にはうまく実験結果を再現できないものもあった。今後、数値解析結果の信頼性を向上させるため、コイル巻線と同等の線材の短尺試料の E - J 特性を測定し、これに基づいたコイル内のより具体的な発熱分布を考慮した解析を行っていく必要がある。

Fig. 8 Temperature dependence of the n -value evaluated from the coil V - I characteristics.

Fig. 9 Numerical results for the terminal voltage and sensor temperature. ($T = 14 \text{ K}$, $I = 1.5 I_c$)

Fig. 10 Comparison between the experimental and analytic results of thermal runaway current.

4. まとめ

Cu-Ni シース Ta バリア MgB_2 多芯線材を用いて作製した試験用小コイルを、幅広い温度領域で過電流通電し、 MgB_2 コイルの熱的安定性を検討した。また、その実験結果と解析結果とを比較した結果、以下の知見が得られた。

- 初期設定温度が低いほど熱暴走に至るまでの温度上昇に余裕がある。 MgB_2 の臨界温度に至るまでの温度マージンが大きいことによるものと考えられる。
- 熱暴走開始点におけるコイル発熱の初期設定温度依存性より、発熱が熱暴走を抑制できる許容発熱の上限と考えると、その限界レベルは、12 ~ 14 K の範囲で極大になった。この許容発熱の主な決定要因としては、温度マージンの初期温度依存性だけでなく、ボビンも含めたコイル全体の各種材料の伝熱効果の影響も考えられる。伝導冷却コイルの安定化設計には、伝

熱材料を含めた構造材の熱伝導率の温度依存性までを考慮した解析が必要になることが示唆されている。

(c) 過電流通電試験の結果を用いて、本線材の交流損失の許容レベルを計算した結果、磁界振幅 1 T, 周波数 1 Hz の使用条件下における交流損失では許容発熱量と比べてまだ低いレベルで安定動作できると考えられる。ただし、コイルの交流損失低減に向けては、冷凍機の全体的な熱負荷に対する許容レベルに加えて、安定動作の観点からの許容レベルまでを考慮する必要がある。

(d) 過電流通電試験の結果を近似的に再現できる解析コードを作成し、実験時に得られたコイルの平均的な $V-I$ 特性から、巻線部での様な発熱に対するコイルの熱的応答について解析を行った。その結果、コイル両端電圧、各温度センサ部及び熱暴走電流に関して、概ね実験結果と一致した。しかし、初期設定温度によっては、一部うまく実験結果を再現できないものもあったため、今後はコイル内の具体的な発熱分布を考慮した解析を実施したい。

最後に、本研究を進めるにあたり、実験結果に関しご討論いただいた物質・材料研究機構の熊倉浩明博士に感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) J. Nagamatsu, et al.: "Superconductivity at 39K in magnesium diboride," *Nature* **410** (2001) 63-64
  - 2) K. Tanaka, et al.: "Fabrication and transport properties of MgB_2 wire and coil," *Physica C* **382** (2002) 203-206
  - 3) H. Yamada, et al.: "Effect of aromatic hydrocarbon addition on in situ powder-in-tube processed MgB_2 tapes," *Supercond. Sci. Technol.* **19** (2006) 175-177
  - 4) S. X. Dou, et al.: "Transport critical current density in Fe-sheathed nano-SiC doped MgB_2 wires," *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **13** (2003) 3199-3202
  - 5) M. Tomsic, et al.: "Development of magnesium diboride (MgB_2) wires and magnets using in situ strand fabrication method," *Physica C* **456** (2007) 203-208.
  - 6) V. Braccini, et al.: "Development of ex situ processed MgB_2 wires and their applications to magnets," *Physica C* **456** (2007) 209-213
  - 7) M. Takahashi, et al.: "Relaxation of trapped magnetic field in a 100m long class MgB_2 solenoid coil in persistent current mode operation," *Supercond. Sci. Technol.* **18** (2005) 373-375
  - 8) K. Funaki, et al.: "Quantitative analysis of normal zone propagation in MgB_2 superconducting wires," *TEION KOGAKU* **43** (2008) 423-429 (in Japanese)
船木和夫ら:「 MgB_2 超伝導線材における常伝導部伝播現象の定量的評価」、*低温工学* **43** (2008) 423-429
  - 9) 例えば, A. Matsumoto, et al.: "Effect of SiO_2 and SiC doping on the powder-in-tube processed MgB_2 tapes," *Supercond. Sci. Technol.* **16** (2003) 926-930
  - 10) 例えば, H. Kumakura, et al.: "High transport critical current density obtained for powder-in-tube processed MgB_2 tapes and wires using stainless steel and Cu-Ni tubes," *Appl. Phys. Lett.* **79** (2001) 2435-2438
  - 11) T. Nakane, et al.: "ex situ fabrication of MgB_2/Al tapes with high critical current density," *Supercond. Sci. Technol.* **19**, (2006) 528-531
  - 12) A. Ishiyama and H. Asai: "A stability criterion for cryocooled-cooled HTS coils," *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **11** (2001) 1832-1836
  - 13) A. Nakao, et al.: Research Reports on Information Science and Electrical Engineering of Kyushu University, to be submitted.
-

田 中 和 英   1987 年株式会社日立製作所日立研究所に入所。超伝導線材及びコイルの開発に従事。現在、九州大学システム情報科学府電気電子システム工学科博士後期過程に在学中。低温工学協会、応用物理学会会員。

中 尾 彰 浩   1984 年 6 月生。2008 年九州大学工学部電気情報工学科卒業。現在、九州大学大学院システム情報科学府電気電子システム工学専攻修士課程 2 年在学中。主に、 MgB_2 超伝導コイルの熱特性の研究に従事。低温工学協会、電気学会会員。

浦 竹 勇希寛   1986 年 7 月生。2009 年九州大学工学部電気情報工学科卒業。現在、九州大学大学院システム情報科学府電気電子システム工学専攻修士課程 1 年在学中。主に、 MgB_2 超伝導コイルの熱特性の研究に従事。低温工学協会、電気学会会員。

柁 川 一 弘   1968 年 3 月生。1990 年九州大学工学部電子工学科卒業。1992 年同大学院工学研究科修士課程（電子工学専攻）修了。現在、九州大学超伝導システム科学研究センター准教授。主に、超伝導線の電磁特性評価や熱的安定性評価、および液体水素と超伝導技術の融合研究開発に従事。低温工学協会、電気学会、応用物理学会会員。博士（工学）。

船 木 和 夫   1948 年 9 月生。1973 年九州大学大学院工学研究科電子工学専攻修士課程修了。同年日本電信電話公社武蔵野通信研究所勤務。1975 年九州大学工学部勤務。現在、同大学院システム情報科学府研究院教授。主に、超伝導工学に関する教育・研究に従事。低温工学協会、電気学会、応用物理学会会員。博士（工学）。

岡 田 道 哉   1959 年 7 月生。1982 年九州大学工学部鉄鋼冶金学科卒業。1984 年 4 月より(株)日立製作所日立研究所に勤務。超伝導材料及び応用システムの開発に従事した。2009 年 10 月より(独)産業技術総合研究所イノベーション推進室。低温工学協会、日本金属学会会員。博士（工学）。